

АВТОМАТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СЕТЕЙ ПЕТРИ ПРИ НАСТРОЙКЕ КООРДИНИРУЮЩИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

А. А. Гурский, А. Е. Гончаренко, С. М. Дубна

Одесская национальная академия пищевых технологий

Аннотация. В настоящей работе рассматривается процесс автоматизированной настройки координирующей системы автоматического управления. Представляются соответствующие структурные схемы рассмотренной системы автоматизированной настройки и принципы ее функционирования. Предлагается определенный принцип формирования сетей Петри, представляющих алгоритмы настройки систем для анализа и корректировки соответствующих процессов. Также в работе представляется схема формирования композиции сети Петри при функционировании искусственной нейронной сети.

В заключительной части работы отражены результаты экспериментов – временные характеристики процесса настройки координирующей системы автоматического управления охлаждением продуктов в туннельной холодильной камере.

Ключевые слова: сети Петри, координирующие системы автоматического управления, нейронные сети.

Введение

Сети Петри являются математическими моделями дискретных динамических систем, а также сети Петри известны как формы представления параллельных алгоритмов и вычислений [1]. Автоматический синтез сетей Петри предполагает в своей основе формирование алгоритмов, которые отражают функционирование дискретных, дискретно-непрерывных или логико-динамических систем [2, 3]. На современном этапе научно-технического развития, разработка принципов автоматического синтеза сетей Петри имеет место в области интеллектуальных технологий активно развивающихся в настоящее время.

Рассматривая определенные случаи использования сетей Петри для анализа функционирования дискретно-непрерывных или логико-динамических систем, можно установить область целесообразного применения методов автоматического формирования сетей Петри и определенных алгоритмов. В частном случае, целесообразность применения принципов автоматического синтеза сетей Петри может быть уместна при формировании поэтапной настройки определенного класса многоуровневых систем автоматического управления.

1. Литературный обзор

В работе [1] Джеймса Питерсона было отмечено, что: «применение языков сетей Петри ле-

жит в области задания и автоматического синтеза сетей Петри. Если задать языком требуемое поведение, то можно будет автоматически синтезировать сеть Петри».

Научных публикаций, связанных с таким понятием как автоматический синтез сетей Петри достаточно мало, однако на их основе можно проследить определенную тенденцию развития соответствующей области синтеза сетей Петри [3 – 7]. После того как было предложено в работе [8] представить сеть Петри алгоритм настройки определенных параметров нейро-нечеткой системы управления, началась соответствующая разработка принципов формирования сетей Петри на основе методов проверки достижимости дискретно-непрерывных сетей [9, 10]. Дальнейшее развитие определенных принципов построения сетей Петри привело к тому, что в основе их формирования используется искусственная нейронная сеть, которая представляет интеллектуальную технологию синтеза определенных алгоритмов [3, 11]. Настоящая работа является продолжением развития данного принципа синтеза сетей Петри, применимого конкретно в области автоматизированной настройки координирующей системы автоматического управления.

2. Актуальность работы

Известно, что координация или согласование переходных процессов обеспечивается в классе многоуровневых систем управления [12]. Многоуровневая координирующая система автоматического управления (КСАУ) должна быть настроена таким образом, чтобы обеспечивалась соподчиненность процессов регулирования, в

противном случае система не будет являться координирующей. Настройку такой системы важно производить поэтапно, так как каждый уровень системы связан с конкретной задачей. Например, нижний уровень системы связан с обработкой отклонений от соотношений значений некоторых регулируемых переменных, второй уровень связан с ликвидацией ошибок регулирования в системе, а верхний уровень связан с оптимизацией параметров системы [13]. В настоящее время класс таких координирующих систем активно развивается, таким образом, актуальна разработка соответствующих алгоритмов настройки, которые применимы не только в области линейных систем автоматического управления, для которых методики синтеза известны [12, 14, 15].

В данном случае также является актуальным формирование алгоритмов настройки и анализ результатов настройки системы управления на основе синтеза и анализа сетей Петри. Таким образом, возможно, обеспечить автоматизацию процесса настройки КСАУ и, соответственно, уменьшить время настройки системы.

3. Цель и задача работы

Целью работы является минимизация времени и автоматизация процесса настройки координирующих систем автоматического управления.

Постановка задачи. Для достижения поставленной цели необходимо разработать систему автоматизированной настройки КСАУ с интеллектуальной технологией, позволяющей автоматически синтезировать сети Петри для анализа алгоритмов настройки систем. Система автоматизированной настройки должна определить все параметры настройки координирующей системы, которые обеспечивают минимизацию выбранного интегрального критерия качества.

4. Принципиальные особенности разработанной системы

Система автоматизированной настройки координирующих систем автоматического управления была разработана в программной среде MATLAB\Simulink. Структурная схема данной системы автоматизированной настройки КСАУ представлена на рисунках 1 и 2.

Из рисунка 1 видно, что регуляторы №1 и №2 обрабатывают отклонение φ от заданного соотношения значений регулируемых переменных X_1 и X_2 , где: $\varphi = |A|^T \cdot \bar{X} + b$; $|A|^T = \begin{vmatrix} a_1 & a_2 \end{vmatrix}$ – матрица коэффициентов, определяющих заданное соотношение между регулируемыми переменными X_1 и X_2 ; $\bar{X} = \begin{vmatrix} X_1 & X_2 \end{vmatrix}^T$; b – свободный член.

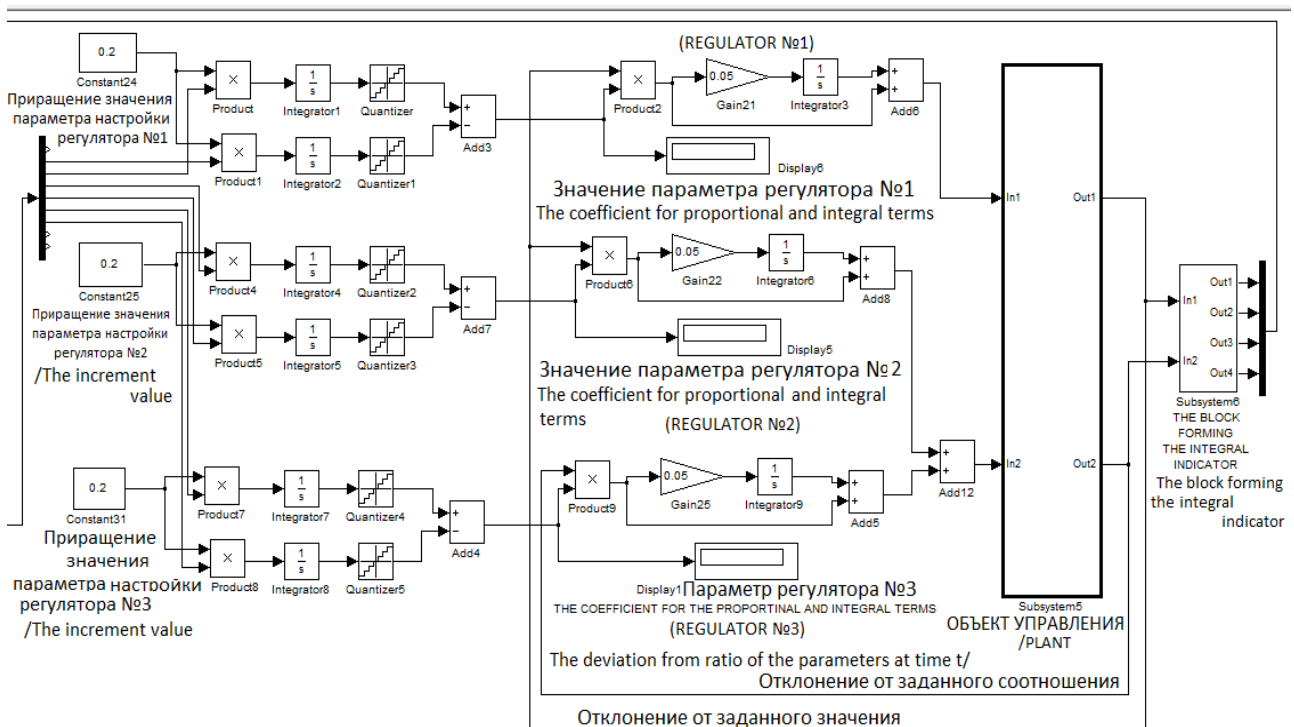


Рис. 1. Структурная схема системы автоматизированной настройки регуляторов различных уровней координирующей системы автоматического управления

Регулятор №3 оброблює відхилення $e(t) = X_{z3} - X_3(t)$ регулюваної величини $X_3(t)$ від заданого значення X_{z3} .

Об'єкт управління, в рамках лінійної моделі, можна описати сукупністю наступних рівнянь:

$$\begin{aligned} X_1 &= W_{11}(p) \cdot u_1 + W_{12}(p) \cdot u_2 + X_{01} \\ X_2 &= W_{21}(p) \cdot u_1 + W_{22}(p) \cdot u_2 + X_{02} \\ X_3 &= W_3(p) \cdot (W_{31}(p) \cdot X_1 + \\ &\quad + W_{32}(p) \cdot X_2 + X_{03}) + X_{04} \end{aligned} \quad (1)$$

де: X_1, X_2, X_3 – регулювані змінні; u_1, u_2 – керуючі впливи; $X_{01}, X_{02}, X_{03}, X_{04}$ – початкові значення регулюваних змінних при $u_1=0, u_2=0$; $W_{ij}(p)$ – передаточна функція по відповідному каналу, де $i=1 \dots 3, j=0 \dots 2$.

При цьому можливі різні варіанти структурних схем моделей об'єктів управління. Наприклад, при $W_{12}(p) = W_{21}(p) = W_{31}(p) = 0, W_{32}(p) = W_3(p) = 1, X_2 = X_3, X_{03} = X_{04} = 0$.

Управляюча частина системи автоматизованої настройки КСАУ зв'язана з процесором, позначеним на малюнку 2 в вигляді блоку Subsystem 31 neuro processor. Даний процесор складається з сукупності локальних нейронних мереж, кожна з яких представляє той чи інший алгоритм поетапної настройки КСАУ. На малюнку 3 представлені дані локальні нейронні мережі в вигляді блоків Subsystem 1 і Subsystem 2 в рамках фрагмента структурної схеми процесора – Subsystem 31.

При настройці певної КСАУ необхідно встановити приращення значень параметрів регуляторів №1, №2, №3 в блоках Constant 24, Constant 25, Constant 31. Далі, виходячи з інерційності об'єкта управління, необхідно позначити інтервали часу t_I по оцінці приращень $\Delta J_{00}, \Delta J_{01}, \Delta J_{02}, \Delta J_{03}$ значень показників якості роботи КСАУ. Таким чином, настройка системи зв'язана з мінімізацією наступних показників:

$$\begin{aligned} \Delta J_{00} &= \left[\int_{t_0}^{t_1} |e(t)| dt - \int_{t_1}^{t_2} |e(t)| dt \right] \rightarrow \min \\ \Delta J_{01} &= \left[\int_{t_0}^{t_1} |\varphi(t)| dt - \int_{t_1}^{t_2} |\varphi(t)| dt \right] \rightarrow \min \\ \Delta J_{02} &= \left[\int_{t_0}^{t_1} (|e(t)| + 3 \cdot |\varphi(t)|) dt - \right. \\ &\quad \left. - \int_{t_1}^{t_2} (|e(t)| + 3 \cdot |\varphi(t)|) dt \right] \rightarrow \min \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Delta J_{03} &= \left[\int_{t_0}^{t_1} (|\varphi(t)| + |e(t)|) dt - \right. \\ &\quad \left. - \int_{t_1}^{t_2} (|\varphi(t)| + |e(t)|) dt \right] \rightarrow \min \end{aligned}$$

де: $e(t)$ – відхилення регулюваної змінної від заданого значення; $\varphi(t)$ – відхилення від заданого співвідношення значень регулюваних змінних в часі.

Інтервали часу t_I позначені в блоках Transport Delay 10, 15, 16, 12, показаних на малюнку 4. В кінцевому підсумку необхідно встановити завдання процесору для запуску певної локальної нейронної мережі, яка буде формувати послідовність операцій поетапної настройки КСАУ і відображати результати настройки в вигляді синтезованої мережі Петрі.

5. Принцип реалізації автоматичного синтезу мереж Петрі

Суть розглянутої процедури автоматичного синтезу мереж Петрі полягає в виконанні наступних двох послідовних етапів:

- 1) Вибір з множини алгоритмів необхідного;
- 2) Корекція вибраного алгоритма і відповідної мережі Петрі.

Два цих етапи можна реалізувати за допомогою штучної нейронної мережі (ІНС) і її тренувки. Данна ІНС позначена в нинішній роботі в вигляді блоку Subsystem 31 (PROCESSOR).

Верхній рівень процесора або вхідний шар штучної нейронної мережі виконує функцію класифікації алгоритмів і вибору локальної нейронної мережі для запуску на функціонування.

Локальна нейронна мережа взаємодіє на принципах зворотного зв'язу з синхронно функціонуючими мережами Петрі, з яких можна реалізувати композицію формованої мережі Петрі. Це продемонстровано на малюнку 5.

Як видно з малюнка, матриця інцидентності синтезованої мережі Петрі аналогічна відповідній матриці коефіцієнтів міжнейронних зв'язань 2-го шару нейронної мережі. Таким чином, якщо синтезована мережа відображає неадекватний алгоритм, то в штучній нейронній мережі повинні відповідно змінитися коефіцієнти міжнейронних зв'язань.

Нейронна мережа взаємодіє з мережами Петрі за допомогою структурно-керуваних переходів $t_{17}, t_{18}, t_{19}, t_{20}$, вихідний сигнал кото-

рых зависит от маркировки позиций p_0, p_2, p_4, p_5 , следующим образом:

$$X_{out,t_{17}} = \begin{cases} 1 & \text{при } \mu(p_0) = 1 \\ 0 & \text{при } \mu(p_0) = 0 \end{cases}$$

Переходы $t_{13}, t_{14}, t_{15}, t_{16}$ срабатывают при наличии выходных сигналов с ИНС и при значении которых предикатные функции $\Pi_i \rightarrow t_{ij}$ истинны. При срабатывании переходов $t_{13}, t_{14}, t_{15}, t_{16}$ появляются маркеры в выходных позициях $p_{11}, p_{12}, p_{13}, p_{14}$.

Таким образом, в процессе функционирования локальная нейронная сеть будет генерировать последовательность выходных сигналов соответствующей инцидентной матрицы синтезируемой сети Петри. А в результате синхронной работы сетей Петри можно выполнить композицию сети Петри, которая будет отражать, в частном случае, алгоритм настройки координирующей системы автоматического управления.

Из рисунка 5 видно, что композиция в сетях Петри реализуется при одновременном срабатывании переходов. Например, переходы t_9 и t_6 при

одновременном срабатывании объединяются в переход t_1 , а переходы t_7 и t_{12} аналогично объединяются в переход t_3 , и так далее можно выполнить композицию соответствующей сети Петри.

6. Эксперименты

В программной среде MATLAB\Simulink 2012 была реализована автоматизированная настройка нескольких различных координирующих систем автоматического управления на основе разработанной системы автоматически формирующей сети Петри.

Результаты экспериментов, связанных с процессом синтеза сетей Петри, неоднократно представлялись в научных работах [3, 9, 11]. Для подтверждения принципиальной пригодности разработанной системы в настоящей работе на рисунке 6 представлены процессы настройки координирующей системы автоматического управления охлаждением продуктов в холодильной туннельной камере.

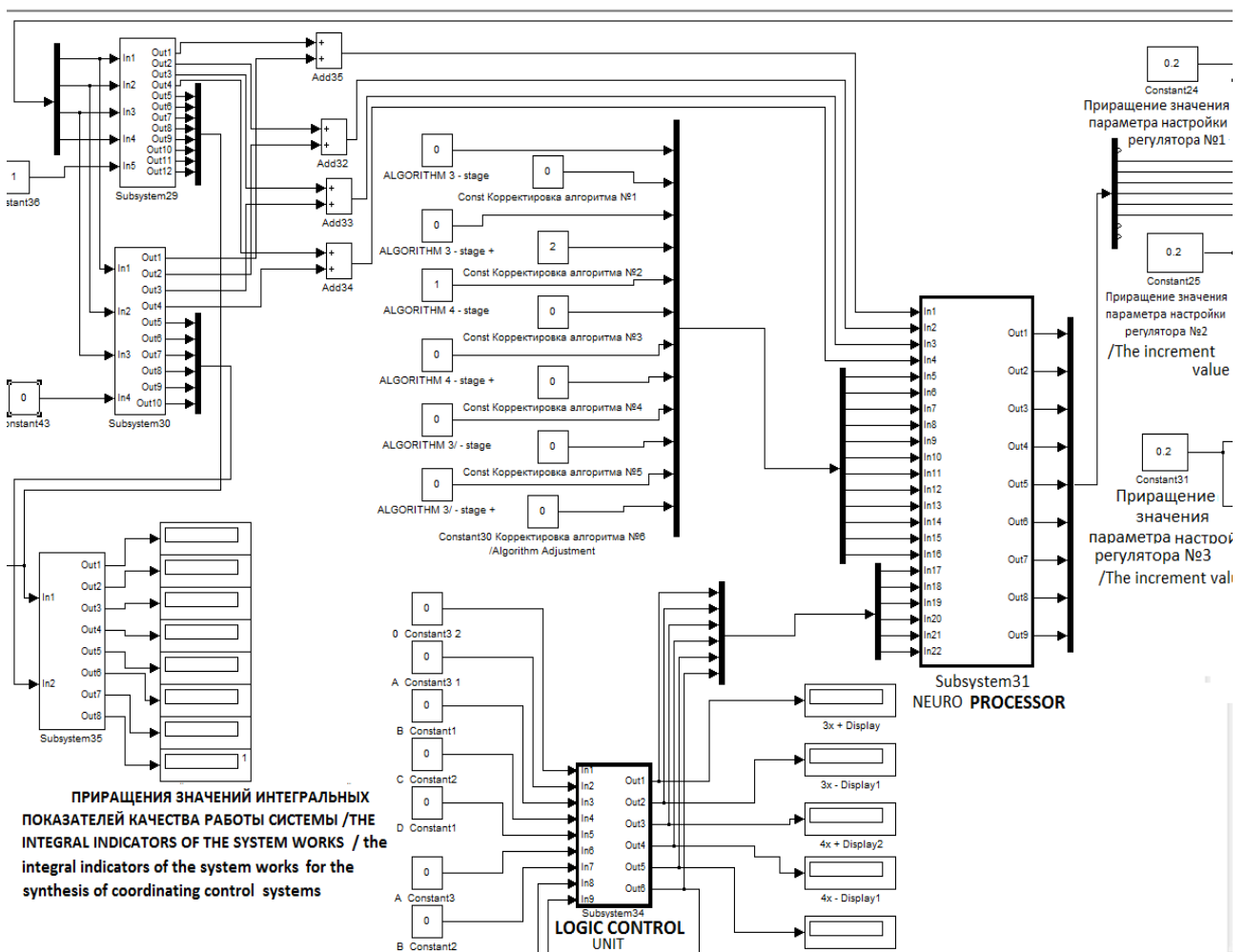


Рис. 2. Структурная схема управляющей части системы автоматизированной настройки КСАУ

Модель холодильної установки с туннельної камерой как объект управления можно описать уравнениями (1) [15]., где:

$$W_{11}(p) = \frac{0,02 \cdot \exp(-1P)}{(15p+1) \cdot (15p+1)} - \text{передаточная функция по каналу, управляющее воздействие } u_1 \text{ по скорости вращения двигателей нагнетателей в туннельной камере - температура воздуха на входе в туннельную камеру } X_1, \text{ } ^\circ\text{C};$$

функция по каналу, управляющее воздействие u_2 по скорости движения транспортера в туннельной камере - температура воздуха на входе в туннельную камеру $X_1, \text{ } ^\circ\text{C};$

$$W_{12}(p) = \frac{0,02 \cdot \exp(-1P)}{(90p+1) \cdot (90p+1)} - \text{передаточная функция по каналу, управляющее воздействие } u_2 \text{ по скорости движения транспортера в туннельной камере - температура воздуха на входе в туннельную камеру } X_1, \text{ } ^\circ\text{C};$$

функция по каналу, управляющее воздействие u_1 по скорости вращения двигателей нагнетателей в туннельной камере - температура воздуха на выходе из туннельной камеры $X_2, \text{ } ^\circ\text{C};$

$$W_{21}(p) = \frac{0,04 \cdot \exp(-1P)}{(10p+1) \cdot (110p+1)} - \text{передаточная функция по каналу, управляющее воздействие } u_1 \text{ по скорости вращения двигателей нагнетателей в туннельной камере - температура воздуха на выходе из туннельной камеры } X_2, \text{ } ^\circ\text{C};$$

функция по каналу, управляющее воздействие u_2 по скорости движения транспортера в туннельной камере - температура воздуха на выходе из туннельной камеры $X_2; X_{01} = -10 \text{ } ^\circ\text{C};$

$$W_{22}(p) = \frac{0,04 \cdot \exp(-1P)}{(90p+1) \cdot (90p+1)} - \text{передаточная функция по каналу, управляющее воздействие } u_2 \text{ по скорости движения транспортера в туннельной камере - температура воздуха на выходе из туннельной камеры } X_2; X_{01} = -10 \text{ } ^\circ\text{C};$$

функция по каналу, управляющее воздействие u_1 по скорости вращения двигателей нагнетателей в туннельной камере - температура воздуха на выходе из туннельной камеры $X_2; X_{01} = -10 \text{ } ^\circ\text{C};$

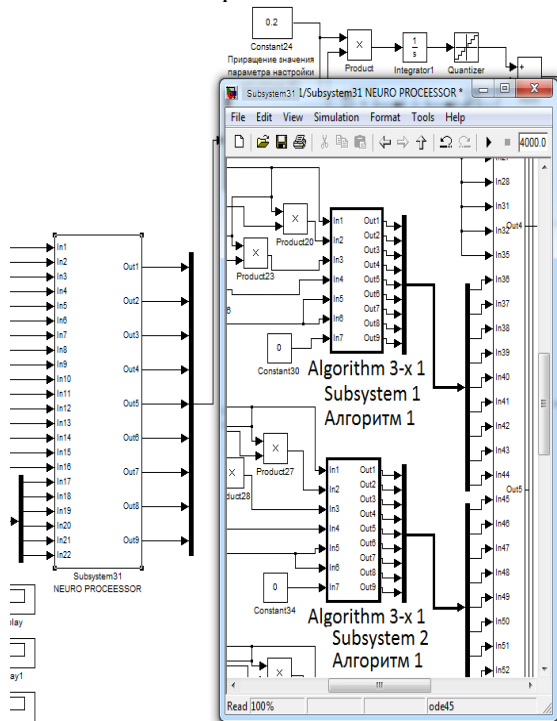


Рис. 3. Фрагмент структурной схемы блока Subsystem 31 processor

$$X_{02} = -4 \text{ } ^\circ\text{C}; W_{31}(p) = 0, W_{32}(p) = W_3(p) = 1, X_2 = X_3, X_{03} = X_{04} = 0.$$

Закон управления рассматриваемой системы следующий:

$$\bar{u} = [u_1 \quad u_2]^T;$$

$$\text{где: } u_1 = k_1 \cdot \left(1 + \frac{0,05}{p}\right) \cdot \varphi;$$

$$u_2 = k_2 \cdot \left(1 + \frac{0,05}{p}\right) \cdot \varphi + k_3 \cdot \left(1 + \frac{0,05}{p}\right) \cdot e;$$

$\varphi(t) = [-1 \quad 3] \cdot \bar{X} + b$ - отклонение от заданного соотношения значений регулируемых переменных; $b = 0$; $\bar{X} = [X_1(t) \quad X_2(t)]^T$ - вектор регулируемых переменных; $e(t) = X_{2Z} - X_2(t)$; X_{2Z} - заданное значение температуры на выходе из холодильной туннельной камеры, $^\circ\text{C}$.

Из рисунка 6 видно, что на каждом этапе настройки, приращение $\Delta J_{0i}, i=0...3$ соответствующего критерия качества работы системы (2) сводится к минимальному значению при изменении определенного параметра $k_j, j=1...3$. На временном интервале от 0 до точки А настраивается регулятор №3 верхнего уровня управления, на участке от А до В настраивается регулятор №1 координирующего уровня управления.

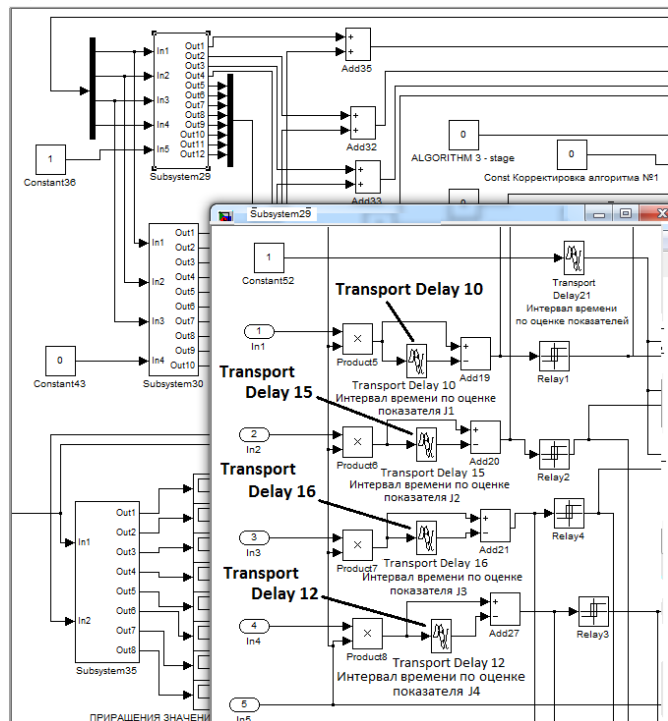


Рис. 4. Фрагмент схемы формирования приращений значений интегральных показателей качества работы системы управления

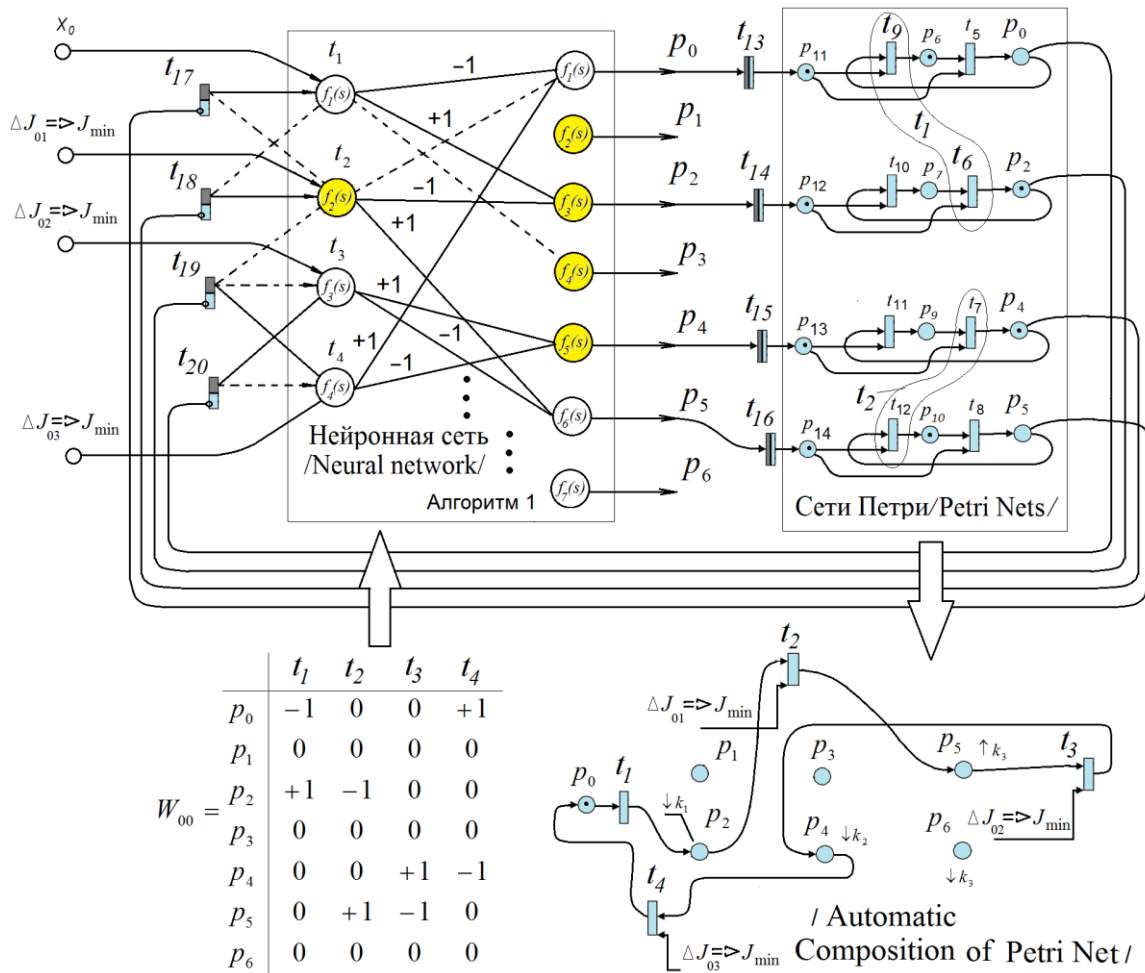


Рис. 5. Схема формирования композиции сети Петри при функционировании искусственной нейронной сети

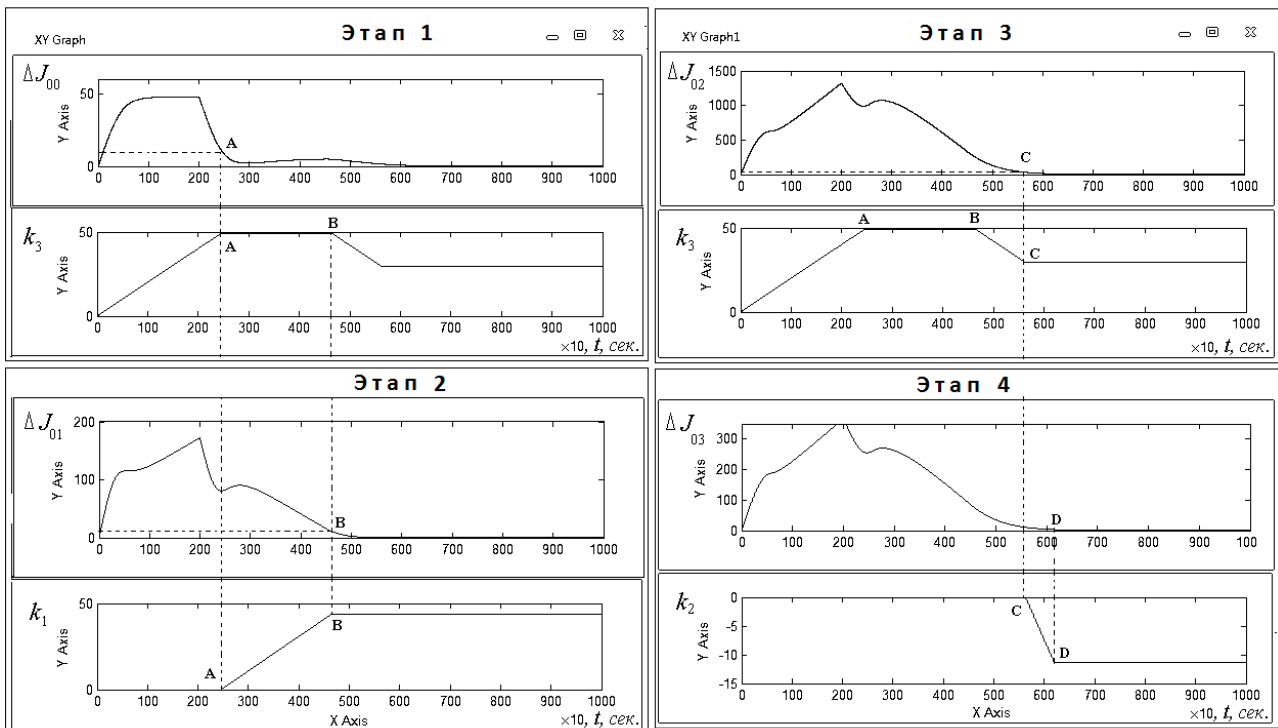


Рис. 6. Временные характеристики процесса настройки координирующей системы автоматического управления охлаждением продуктов в туннельной камере

Затем на участке В – С корректируется параметр настройки k_3 регулятора №3 и в конечном итоге на 4 этапе настраивается регулятор №2 координирующего уровня. Таким образом, система получает конечные значения параметров настройки k_1, k_2, k_3 КСАУ, которые обеспечивают соответствующее качество регулирования с учетом обеспечения режима разделения движения [4].

Каждый этап процесса настройки, представленный на рисунке 6, реализуется согласно сгенерированной сети Петри, которая отражает процесс настройки КСАУ.

Искусственная нейронная сеть реализует формирование и функционирование сети Петри пошагово. На каждом шаге представляется сеть Петри соответственно под номерами 1, 2 и т.д., как показано на рисунке 7.

Например, согласно рисунку 7, если переход t_1 ведет к нежелательной ситуации – значения интегральных показателей качества системы за

пределами допустимого, то отмечается ошибка на переходе t_1 и изменяются коэффициенты межнейронных соединений таким образом, что синтезируется сеть Петри, представленная под номером 3. Следовательно, если были ошибки на переходах t_1 и t_2 , то сформируется сеть Петри под номером 4 и так далее, согласно операциям, представленным на рисунке 7.

7. Обсуждения

Как видно из временных характеристик, представленных на рисунке 6, процесс настройки системы осуществляется при условии устойчивой ее работы. Все значения приращений уставов критериев качества работы системы стремятся к нулю, что указывает не только на устойчивую работу синтезируемой системы управления, но и на положительный результат настройки.

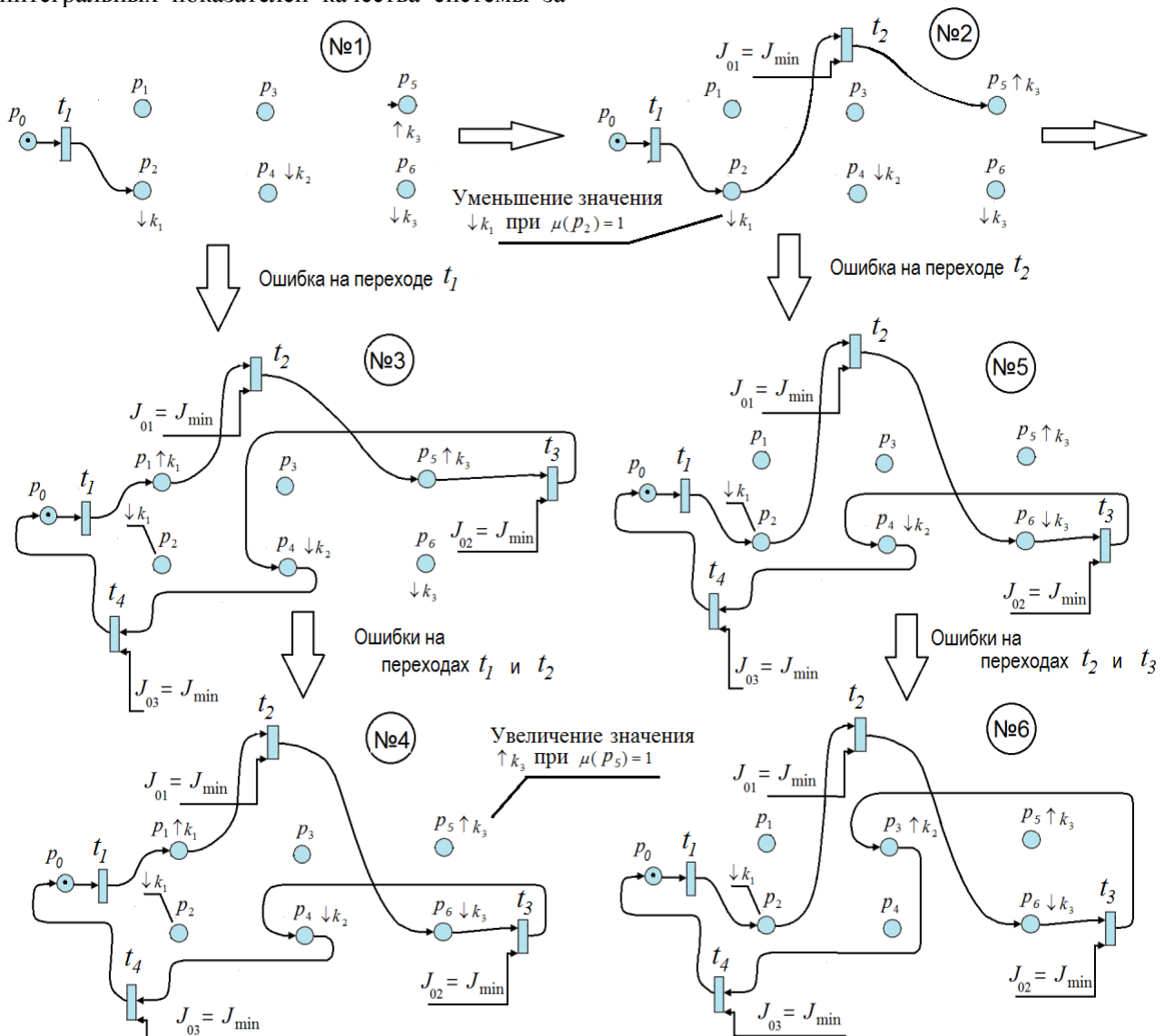


Рис. 7. Визуализация процессов синтеза различных сетей Петри, которые отражают этапы настройки координирующей системы автоматического управления

Сформированная сеть Петри, представленная на рисунке 5, отражает соответствующий алгоритм настройки системы, однако корректировка данной сети Петри пользователем или экспертом повлечет внедрение в процесс перенастройки искусственной нейронной сети. Следовательно, процесс согласования таких действий, которые влекут изменение сети Петри согласно рисунку 7, важно рассмотреть как отдельный способ тренировки искусственной нейронной сети с учителем.

Выводы

В настоящей работе была решена поставленная задача, связанная с разработкой системы автоматизированной настройки координирующих систем автоматического управления. В процессе выполнения поставленной задачи получила дальнейшее развитие методика автоматического синтеза сетей Петри на основе функционирования искусственных нейронных сетей.

Дальнейшее развитие научной работы непосредственно должно быть связано с самообучением нейронных сетей при синтезе сетей Петри. Это позволяет расширить область применения интеллектуальных технологий в соответствии с частным случаем синтеза сетей Петри и в случае автоматической настройки сложных многоуровневых систем управления.

Список использованной литературы

1. Питерсон, Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем [Текст] / Дж. Питерсон – М.: Мир 1984. – 264 с.
2. Нестерюк, О. Г. Інформаційна технологія моделювання і аналізу дискретно-неперервних автоматизованих систем управління : автореф. дис. на здобуття наукового ступеня канд. тех. наук : спец.05.13.06 «Інформаційні технології» [Текст] / О. Г. Нестерюк. – Одесса, 2016. – 23 с.
3. Гурский, А. А. Генерация сети Петри на базе средств дискретно-непрерывных сетей при формировании алгоритма автоматической настройки координирующей системы управления [Текст] / А. А. Гурский, А. Е. Гончаренко, А. В. Денисенко // Электротехнические и компьютерные системы. – Одесса: 2017. – № 26 (102). – С. 78–87. ISSN 2221-3805
4. He, D. W. Decomposition in automatic generation of Petri nets for manufacturing system control and scheduling [Text] / D. W. He, B. Strege, H. Tolle, A. Kusiak // International Journal of Production Research – 2000. – Volume 38, Issue 6, – pages 1437–1457. DOI: 10.1080/002075400188942
5. Ndiaye, M. A. A. et al. Performance assessment of industrial control system during pre-sales uncertain context using automatic Colored Petri Nets model generation [Text] //2016 International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). – IEEE, 2016. – pages 671–676. DOI: 10.1109/CoDIT.2016.7593643
6. Durmuş, M. S., Yıldırım, U., Söylemez, M. T. Automatic generation of Petri Net supervisors for railway interlocking design [Text] / M. S. Durmuş, U. Yıldırım, M. T. Söylemez //2012 2nd Australian Control Conference. – IEEE, 2012. – P. 180–185.
7. Харитонов, Д. И. Метод генерации при- меров моделей программ в терминах сетей Петри [Текст] / Д. И. Харитонов, Е. А. Голенков, Г. В. Тарасов, Д. В. Леонтьев // Моделирование и анализ информационных систем. – 2015. – №4. – С. 563–577. DOI:10.18255/1818-1015-2015-4-563-577
8. Гурский, А. А. Контур самонастройки нейро-нечеткой системы управления холодильной установкой с центробежным компрессором [Текст] / А. А. Гурский, В. А. Денисенко, А. Е. Гончаренко // Автоматизация технологических і бізнес-процесів. – 2014. – №. 6, № 4. – С. 92–101. DOI: 10.15673/2312-3125
9. Gurskiy, A. A. Formation of the synthesis algorithms of the coordinating control systems by means of the automatic generation of Petri nets [Text] / A. A. Gurskiy, A. E. Goncharenko, S. M. Dubna // Automation of technological and business processes. – Volume 8, Issue 3/2016 – P. 13–23.
10. Денисенко, Т. А. Исследование достижимости непрерывной части гибридной системы [Текст] / Т. А. Денисенко, А. Г. Нестерюк, А. В. Денисенко // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2018. – № 2. – С. 23–29. ISSN 1560-9189
11. Гурский, А. А. Настройка нейронной сети при автоматическом синтезе сетей Петри [Текст] / А. А. Гурский, С. М. Дубна // Автоматизация технологических и бизнес-процессов. – Одесса: 2018. — Т. 10 – №1. – С. 22–32. DOI: 10.15673/atbp.v10i1.877
12. Бойчук, Л. М. Синтез координирующих систем автоматического управления [Текст] / Л. М. Бойчук. – М.: «Энергоатомиздат», 1991. – 160 с.
13. Гурский, А. А. Системы автоматического регулирования производительности холодильных центробежных компрессоров [Текст] / А.А. Гурский, В. А. Денисенко, А. Е. Гончаренко // Холодильная техника и технология. – 2013. – № 5 – С. 72–76.
14. Филимонов, А. Б. О проблематике синтеза координирующих систем автоматического управления [Текст] / А. Б. Филимонов, Н. Б. Филимонов // Известия Южного федерального уни-

верситета. Технические науки. – 2012. – Т. 128. – №. 3.– С. 172–180.

15. Дубна, С. М. и др. Разработка алгоритмов управления процессами охлаждения продуктов в туннельных камерах [Текст] / С. М. Дубна, А. А. Гурский, А. Е. Гончаренко, Н. А. Пантелюк //Холодильна техніка та технологія. – Одесса: 2018. – № 5.– С. 67–71. ISSN 0453-8307

References

1. Peterson, James L. (1984) Petri Net Theory And The Modeling Of System [Теорія мережі Петрі і моделювання систем] Moscow, Mir, 264 p.

2. Nesteruk, A. G. (2016) Information technology modeling and analysis of discrete-continuous automated control systems [Інформаційна технологія моделювання та аналізу дискретно-неперервних автоматизованих систем управління] *Abstract*. The dissertation for a candidate of technical sciences, Odessa, 23 p.

3. Gurskiy, A. A., Goncharenko, A. E., Denisenko, V. A. (2016) Generation of the Petri net by means of the resources of the discrete-continuous nets in the algorithm formation for the self-tuning of the coordinating control systems [Generaciya seti Petri na baze sredstv diskretno_nepreerivnih setei pri formirovanii algoritma avtomaticheskoi nastrojki koordiniruyushei sistemi upravleniya] *Electrotechnical and Computer Systems*, vol. 26, pp. 78–87, ISSN 2221-3805

4. He, D. W., Strege, B., Tolle, H., Kusiak, A., (2000) Decomposition in automatic generation of Petri nets for manufacturing system control and scheduling. *International Journal of Production Research*, Volume 38, Issue 6, – pages 1437–1457, DOI: 10.1080/002075400188942

5. Ndiaye, M. A. A., et al. (2016) Performance assessment of industrial control system during pre-sales uncertain context using automatic Colored Petri Nets model generation. 2016 *International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, IEEE, – pages 671–676, DOI: 10.1109/CoDIT.2016.7593643

6. Durmuş, M. S., Yıldırım, U., Söylemez, M. T. (2012) Automatic generation of Petri Net supervisors for railway interlocking design. 2012 *2nd Australian Control Conference*. IEEE, – pages 180–185.

7. Kharitonov, D. I., Golenkov, E. A., Tarasov, G. V., Leontyev, D. V. (2015) A Method of Sample Models of Program Construction in Terms of Petri Nets. [Metod generacii primerov modelei programm v terminah setei Petri] *Modeling and Analysis of In-*

formation Systems. Vol. 22, No 4 pp. 563–577, DOI: 10.18255/1818-1015-2015-4-563-577

8. Gurskiy, A. A., Denisenko, V. A. Goncharenko, A. E. (2014) Contour of seif-adjustment of a neuro and indistinet control system of the refrigeration unit with the centrifugal compressor [Kontur samonastrojki nejro-nechetkoj sistemy upravlenija holodil'noj ustanovkoj s centrobezhnym kompressorom] *Automation of technological and business processes*, vol. 4, pp. 92–101, DOI: 10.15673/2312-3125

9. Gurskiy, A. A., Goncharenko A. E., Dubna S. M. (2016) Formation of the synthesis algorithms of the coordinating control systems by means of the automatic generation of Petri nets. *Automation of technological and business processes*, Volume 8, Issue 3, pp. 13–23.

10. Denisenko, T. A., Nesteryuk, A. G., Denisenko, A. V. (2018) Reachability research of the continuous part of hybrid system [Issledovanie dostijimosti nepreerivnoi chasti gibridnoi sistemi] *Data Recording, Storage & Processing*, Volume 20, Issue 2, pp. 23–29, ISSN 1560-9189

11. Gurskiy, A. A., Dubna S. M. (2018) Tuning of neural network during automatic synthesis of Petri nets [Nastrojka neuronnoi seti pri avtomaticheskoi sinteze setei Petri] *Automation of Technological and Business Processes*, Volume 10, Issue 1, pp. 22–32, <https://doi.org/10.15673/atbp.v10i1.877>

12. Boychuk, L. M. (1991) Synthesis of coordinated systems of automatic control [Sintez koordiniruyushih sistem avtomaticheskogo upravlenija] Moscow, Energoatomizdat, 160 p.

13. Gurskiy, A. A., Denisenko, V. A., Goncharenko, A. E. (2013) Systems of automatic control refrigerating centrifugal compressors capacity [Sistemi avtomaticheskogo regulirovaniya proizvoditelnosti holodilnih centrobezhnih kompressorov] *Refrigerating engineering and technology*, no. 5, pp. 72–76.

14. Filimonov, A. B., Filimonov, N. B. (2012). Concerning the problems of synthesis of coordinated systems of automatic control [O problematike sinteza koordiniruyuschih sistem avtomaticheskogo upravleniya] *Izvestiya SfedU, Engineering sciences*, vol. 3, pp. 172–180.

15. Dubna, S. M., Gurskiy, A. A., Goncharenko, A. E. (2018) The working out of algorithms in control of the cooling processes of products in the tunnel cameras [Razrabotka algoritmov upravleniya protsessami ohlajdeniya prodýktov v týnnelnyh kamerah] *Refrigeration Engineering and Technology*, no. 5. pp. 67–71, ISSN 0453-8307

AUTOMATIC SYNTHESIS OF PETRI NETS AT TUNING UP OF THE COORDINATING AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS

A. A. Gurskiy, A. E. Goncharenko, S. M. Dubna
Odessa National Academy of Food Technologies

Abstract. *The process of automated tuning for the coordinating automatic control system is considered in this paper. This process of tuning for the coordinating control system is linked to the automatic synthesis of Petri nets based on functioning of the artificial neural network. Thereby, we can automate the process of tuning and synthesis of system models and also solve the urgent task linked to the minimization of tuning time for the multilevel control systems.*

The purposes of the scientific work are time reduction of the tuning and automatization of the tuning for the multilevel coordinating systems of the automatic control.

In order to achieve this purpose in the MATLAB \ Simulink software environment it is necessary to develop the system for automated tuning of the regulators of various levels for the coordinating automatic control system. The application of artificial neural network with automatic synthesis of Petri nets allows to introduce intelligent technology in the automated tuning system. In this work we have presented the corresponding block diagrams of considered automated tuning system and the principles of its functioning.

The certain principle of the formation of Petri nets is proposed. These Petri nets represent the algorithms of tuning in the systems for analysis the corresponding processes. The formation of the composition in the scheme from Petri net during the functioning of the artificial neural network is presented in the paper.

The results of experiment are presented in the final part of this work. This time characteristics of the process of setting up for the coordinating automatic control system of foodstuffs cooling in tunnel chamber. The experiments were conducted in the Matlab 2012a environment. Based on the results of the experiment we have depicted the process of synthesis of the Petri net representing the system tuning algorithm.

The performed experiments have showed the principal suitability of the automated search system for the settings of the regulators of various levels of the coordinating control system. The technique of automatic synthesis of Petri nets based on the functioning of artificial neural networks has obtained the further development while performing the approved task in the scientific paper.

Keywords: *Petri nets, coordinating automatic control system, artificial neural network.*

АВТОМАТИЧНИЙ СИНТЕЗ МЕРЕЖ ПЕТРІ ПРИ НАСТРОЮВАННІ КООРДИНУВАЛЬНИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ

О. О. Гурський, О. Є. Гончаренко, С. М. Дубна
Одеська Національна Академія Харчових Технологій

Анотація. *В даній роботі розглядається процес автоматизованого настроювання координувальної системи автоматичного управління. Даний процес настроювання координувальної системи пов'язаний з автоматичним синтезом мереж Петрі на основі функціонування штучної нейронної мережі. Це дає можливість автоматизувати процес настроювання і синтезу моделей систем, а також вирішити актуальну задачу, пов'язану з мінімізацією часу настроювання багаторівневих систем управління.*

Метою роботи є мінімізація часу та автоматизація процесу настроювання координувальних систем автоматичного управління.

Для досягнення поставленої мети в програмному середовищі MATLAB\Simulink була розроблена система автоматизованого настроювання регуляторів різних рівнів координувальної системи автоматичного управління. В даній роботі також представлені відповідні структурні схеми розглянутої системи автоматизованого настроювання і принципи її функціонування.

Запропонований певний принцип формування мереж Петрі, що представляють алгоритми настроювання систем для аналізу і коректування відповідних процесів. Представляється схема формування композиції мережі Петрі при функціонуванні штучної нейронної мережі.

У заключній частині роботи зображені результати експериментів – часові характеристики процесу настроювання координувальної системи автоматичного управління охолодження продуктів у тунельній холодильній камері. Експерименти були проведені в середовищі MATLAB\Simulink 2012. На

основі аналізу результатів експерименту зображується процес синтезу мережі Петрі, що представляє алгоритм настроювання системи.

Проведені експерименти показали принципову придатність системи автоматизованого пошуку параметрів настроювання регуляторів різних рівнів координувальної системи. У процесі виконання поставленої задачі одержала подальший розвиток методика автоматичного синтезу мереж Петрі на основі функціонування штучних нейронних мереж.

Ключові слова: мережі Петрі, координувальні системи автоматичного управління, штучні нейронні мережі.

Получено 16.01.2020



Гурский Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов и робототехнических систем Одесской национальной академии пищевых технологий, ул. Канатная, 112, Одесса, Украина, E-mail: gurskiya2017@gmail.com, тел. +38-096-375-45-01

Alexander Gurskiy, candidate of technical science, lecturer of the department of automation of technological processes and robot-technical systems, Odessa National Academy of Food Technologies, 112, Kanatna Street, Odessa, Ukraine.

ORCID ID: 0000-0001-5158-2125



Гончаренко Александр Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов и робототехнических систем Одесской национальной академии пищевых технологий, ул. Канатная, 112, Одесса, Украина, E-mail: holod.automatic@gmail.com, тел. +38-048-720-91-27

Alexander Goncharenko, PhD, candidate of technical science, associate professor of department of technological processes automation and robot-technical systems, Odessa National Academy of Food Technologies, 112, Kanatna Street, Odessa, Ukraine.

ORCID ID: 0000-0003-4959-6469



Дубна Сергей Михайлович, старший преподаватель кафедры автоматизации технологических процессов и робототехнических систем Одесской национальной академии пищевых технологий, ул. Канатная, 112, Одесса, Украина, E-mail: holod.automatic@gmail.com, тел. +38-048-720-91-27

Sergey Dubna, Lecture of Department of Technological Processes Automation and Robot-technical Systems, Odessa National Academy of Food Technologies, 112, Kanatna Street, Odessa, Ukraine. E-mail: holod.automatic@gmail.com

ORCID ID: 0000-0002-2483-5817